

بررسی تجربی تأثیرات متقابل بیواتانول، استون و ان-بوتانول به عنوان افزودنی سوخت بنزین بر عملکرد، آلاینده‌گی یک موتور اشتعال جرقه‌ای

هادی غائبی^{۱*}، سینا فیض‌اله‌زاده اردبیلی^{۲*}، حسین بابازاده^۳

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، hghaebi@uma.ac.ir

۲- دکتری تخصصی، انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، sina_fa1990@yahoo.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، hosinbabazadeh74@gmail.com

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷)

چکیده: هدف کلی از این تحقیق دستیابی به ترکیب سوخت مناسب حاوی بیواتانول، بنزین، استون و ان-بوتانول در راستای افزایش عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌های موتور و هزینه تولید انرژی است. در این تحقیق به منظور ارزیابی تأثیر نمونه سوخت‌ها، موتور تک سیلندر با یک ژنراتور ۵ کیلووات ساعت کوپل شد. برای تحت بار قرار دادن موتور از یک مقاومت متغییر نوع TDGC2-5kVA و یک هیتر یک کیلووات ساعت استفاده شد. با اندازه‌گیری توان موتور مقدار آمپر و ولتاژ برق اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است آزمون موتور در بار کامل (بار ۱۰۰ درصد) و دور ثابت ۱۵۰۰ دور در دقیقه به عنوان دور نامی موتور انجام گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، افزودن ان بوتانول از ۲ تا ۵ درصد به طور نسبی موجب کاهش و از ۵ تا ۷ درصد موجب افزایش نسبی توان ترمزی شد. کمترین میزان توان ترمزی در محدوده افزودنی‌های تلفیقی بیواتانول و ان بوتانول فاقد استون به دست آمد. بالاترین میزان توان ترمزی در بالاترین درصد تلفیق افزودنی‌های ان بوتانول، استون و بیواتانول در نمونه سوخت بنزین به دست آمد. در این بازه، بازه حرارتی نیز نسبت به نمونه سوخت شاهد بالاتر و مصرف سوخت ویژه ترمزی نیز نسبت به نمونه سوخت شاهد کمتر بود. بالاترین میزان انتشار مونوکسید نیتروژن به طور نسبی در نمونه سوخت‌های حاوی افزودنی‌های تلفیقی بیواتانول و ان-بوتانول بود. کمترین میزان انتشار مونوکسید نیتروژن در نمونه سوخت‌های حاوی تلفیق بیواتانول و استون رخ داد. با افزودن ان بوتانول به نمونه‌های سوخت، میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن افزایش یافت. نتایج همچنین نشان داد که اثرات این افزودنی‌ها می‌تواند به شدت به طراحی موتور، شرایط عملیاتی و نسبت‌های ترکیب خاص مورد استفاده وابسته باشد. این تحقیق راه را برای چندین جهت تحقیقاتی آینده در زمینه افزودنی‌های سوخت جایگزین و موتورهای اشتعال جرقه‌ای هموار می‌کند.

کلیدواژه‌گان: افزودنی‌های سوخت، بیواتانول، موتور اشتعال جرقه‌ای، ان-بوتانول، استون

مقدمه

سوخت‌های زیستی را می‌توان در موتورهای احتراق داخلی با تغییرات اندک یا بدون تغییر مورد استفاده قرار داد و آن‌ها را به جایگزینی کاربردی تر و در دسترس برای سایر فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر مانند وسایل نقلیه الکتریکی تبدیل کرد [۱، ۲]. همچنین سوخت‌های زیستی را می‌توان با بنزین یا سوخت دیزل ترکیب کرد و جایگزینی با کربن کمتر ارائه کرد که می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل را کاهش دهد [۳-۵].

سوخت‌های زیستی می‌توانند جایگزینی عملی و کم هزینه برای سوخت‌های سنتی بنزین و دیزل، به‌ویژه برای موتورهای احتراق داخلی، ارائه دهند. در حالی که آن‌ها راه حلی برای چالش‌های حمل و نقل نیستند، اما می‌توانند نقش مهمی را در کنار سایر فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در دستیابی به یک سیستم حمل و نقل پاک تر و پایدار تر ایفا کنند [۶، ۷]. برای موتورهای اشتعال جرقه ای، بیواتانول رایج ترین سوخت زیستی است که به عنوان مخلوط با بنزین استفاده می‌شود. بیواتانول را می‌توان با بنزین در غلظت‌های تا ۱۰ درصد بدون تغییر در موتور مخلوط کرد. غلظت‌های بالاتر اتانول، مانند E15 یا E85، ممکن است نیاز به تغییراتی در موتور یا سیستم سوخت داشته باشد. کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، افزایش امنیت انرژی، سازگاری با زیرساخت‌های موجود، و بازدهی اقتصادی از جمله مزایای استفاده از سوخت‌های زیستی در موتورهای احتراق داخلی است [۸-۱۱]. از طرفی دیگر عدم دسترسی به مواد اولیه، محدودیت تغییر کاربری زمین، تعادل انرژی، و نیاز به زیر ساخت‌های اصلی از جمله معایب استفاده از سوخت‌های زیستی در موتورهای احتراق داخلی است [۱۲-۱۵]. در حالی که سوخت‌های زیستی به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر برای موتورهای احتراق داخلی فواید زیادی ارائه می‌دهند، اما در تبدیل شدن به یک جایگزین پرکاربرد برای سوخت‌های فسیلی نیز با چالش‌های مهمی روبرو هستند. پرداختن به این چالش‌ها مستلزم پیشرفت‌های تکنولوژیکی، حمایت از سیاست‌ها و آگاهی عمومی برای ترویج تولید و استفاده پایدار از سوخت‌های زیستی است [۱۶].

بیواتانول نوعی سوخت زیستی است که از محصولاتی مانند ذرت، نیسکر یا گندم تهیه می‌شود. معمولاً به عنوان مخلوط با بنزین در موتورهای اشتعال جرقه ای، مانند موتورهایی که در اتومبیل‌ها و موتورسیکلت‌ها یافت می‌شوند، استفاده می‌شود. بیواتانول می‌تواند جایگزینی عملی و کم‌هزینه برای بنزین سنتی در موتورهای اشتعال جرقه‌ای باشد. در حالی که دارای برخی ویژگی‌ها و چالش‌های منحصر به فرد در مقایسه با بنزین است، ادامه تحقیق و توسعه در این زمینه پتانسیل ارائه جایگزین پایدارتر و کم کربن برای سوخت‌های فسیلی را دارد [۱۷].

بیواتانول چگالی انرژی کمتری نسبت به بنزین دارد، به این معنی که انرژی کمتری در واحد حجم دارد. به‌طور خاص، بیواتانول در هر واحد حجم حدود ۳۴ درصد انرژی کمتری نسبت به بنزین دارد. این چگالی انرژی کمتر می‌تواند باعث مصرف سوخت کمتر در هنگام استفاده از بیواتانول در موتورهای جرقه‌زن شود [۱۸].

هنگامی که بیواتانول با بنزین مخلوط می‌شود، سوخت حاصله حاوی انرژی کمتری در هر گالن نسبت به بنزین خالص است. در نتیجه، خودروهایی که از ترکیبات بیواتانول استفاده می‌کنند ممکن است در مقایسه با استفاده از بنزین خالص، کاهش مصرف سوخت را تجربه کنند [۱۹].

با این حال، عدد اکتان بالاتر بیواتانول می‌تواند باعث افزایش نسبت تراکم موتور شود که می‌تواند مصرف سوخت را بهبود بخشد [۲۰]. این روند می‌تواند تا حدی چگالی انرژی کمتر بیواتانول زیستی را جبران کند. علاوه بر این، مزایای زیست محیطی استفاده از بیواتانول زیستی، مانند کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش وابستگی به نفت وارداتی، ممکن است بر کاهش بالقوه در مصرف سوخت بیشتر باشد.

چگالی انرژی پایین بیواتانول می‌تواند بر مصرف سوخت در هنگام استفاده از ترکیبات بیواتانول در موتورهای جرقه‌زن تأثیر بگذارد، اما این تأثیر را می‌توان با عوامل دیگری مانند نسبت تراکم موتور بالاتر کاهش داد و مزایای زیست‌محیطی ممکن است این مبادله را توجیه کند [۲۱].

مطالعات متعددی در زمینه بررسی تأثیرات بیواتانول حاوی افزودنی‌ها در سوخت بنزین بر عملکرد و آلایندگی موتور اشتعال جرقه‌ای انجام شده است. در مطالعه انجام شده توسط ممت و همکاران (۲۰۲۲) اثر سوخت بنزین در ترکیب با سوخت بیواتانول (در حجم‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) برای بررسی احتراق، عملکرد و انتشارات آگروز مورد بررسی قرار گرفت. موتور مورد استفاده با برند میتسوبیشی با حجم ۱/۸ لیتر، چهار سیلندر، چهار زمانه، و تزریق چند نقطه‌ای مجهز به سیستم توربوشارژ بود. موتور در دورهای ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه در بارهای ۱۰ تا ۴۰ درصد با دریچه گاز باز مورد استفاده قرار

گرفت. نتایج نشان داد که افزودن بیواتانول به بنزین باعث افزایش گشتاور ترمزی در بارهای بالا می‌شود. کسر جرمی سوخت و ضریب تغییرات ترکیب بیواتانول و سوخت اصلی با یکدیگر مقایسه شدند. مصرف سوخت ویژه ترمزی با افزایش دور موتور به طور قابل توجهی افزایش یافت. انتشار اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن و انتشار هیدروکربن در مقایسه با سوخت بنزین به طور چشمگیری کاهش یافت. در واقع، ترکیب سوخت زیستی بیواتانول با سوخت بنزین در نسبت کم برای افزایش عملکرد موتور و انتشار کمتر آگروز می‌تواند پیشنهاد شود [۲۲].

سوگیارتو و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه‌ای با هدف تعیین اثر افزودنی سیکلواکتانول اکسیژنه بر ترکیبات بیواتانول-بنزین در مصرف سوخت ویژه و ضریب تغییرات عملکرد موتور اشتعال جرقه‌ای انجام دادند. آزمایش‌ها با استفاده از دینامومتر برای اندازه‌گیری عملکرد موتور انجام شد. بر اساس نتایج، مخلوط حاوی ۱۰ درصد بیواتانول و ۹۰ درصد بنزین با افزودن ۱.۳٪ افزودنی سیکلواکتانول، مقرون به صرفه‌ترین مقدار مصرف سوخت ویژه و کمترین مقدار تغییرات عملکرد را در مقایسه با مخلوط‌های سوخت دیگر تولید می‌کنند. آزمایش تجربی نشان داد که افزودن مواد افزودنی به سوخت بیواتانول می‌تواند عملکرد موتور اشتعال جرقه‌ای را بهبود بخشد [۲۳].

سوگیتا و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه‌ای با هدف تعیین اثر افزودنی‌های سیکلوهگزانول اکسیژن‌دار به ترکیبات بیواتانول-بنزین بر عملکرد موتور اشتعال جرقه‌ای و انتشار گازهای خروجی انجام دادند. این آزمایش با استفاده از دینامومتر برای اندازه‌گیری عملکرد موتور، مبدل فشار برای اندازه‌گیری فشار سیلندر و آنالایزر گاز خروجی برای اندازه‌گیری انتشار گازهای خروجی انجام شد. این آزمایش نشان داد که مخلوط سوخت ۸۰٪ بنزین، ۲۰٪ مخلوط سوخت بیواتانول با افزودن ۱۸ میلی لیتر سیکلوهگزانول اکسیژن‌دار بهترین نتایج را در میان سایر مخلوط‌های آزمایش شده ایجاد کرد. این شرایط مصرف سوخت ویژه و مقدار ضریب تغییرات را کاهش داد و گازهای سمی کمتری منتشر کرد، در حالی که تلفات نیرو و گشتاور را به حداقل رساند [۶].

در مطالعه انجام شده توسط یامین و همکاران (۲۰۲۰) از داده‌های فشار سیلندر برای آنالیز و ارزیابی تأثیر ترکیبات سوخت بیواتانول-بنزین حاوی افزودنی‌های اکسیژن‌دار در عملکرد یک موتور اشتعال جرقه‌ای استفاده شد. بر اساس تحقیقات قبلی که در مورد تجزیه و تحلیل انتشارات آگروز در موتور اشتعال جرقه‌ای با سوخت بیواتانول حاوی افزودنی اکسیژن‌دار بحث می‌کرد، در این مقاله بیشتر بر تجزیه و تحلیل ویژگی‌های ترکیب بیواتانول و افزودنی اکسیژن‌دار و نرخ انتشار گرما پرداخته شد. مخلوط سوخت مختلف و همچنین ارتباط ویژگی‌های ترکیب بیواتانول و افزودنی اکسیژن‌دار با نرخ انتشار گرما در دور موتور متغیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با بنزین خالص، ترکیب بیواتانول باعث کاهش نرخ انتشار گرما می‌شود. هنگامی که افزودنی اکسیژن‌دار به مخلوط بنزین-اتانول اضافه می‌شود، حداکثر سرعت انتشار گرما را به خصوص در مخلوط سوخت حاوی ۵ درصد بیواتانول در حدود ۶/۲٪ در مقایسه با سوخت شاهد افزایش می‌دهد [۲۴].

لی و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای، اثرات اختلاط بیواتانول با بنزین بر انتشار ذرات و انتشار گاز در تزریق فشار بالا تا ۵۰ مگاپاسکال در موتور تزریق مستقیم بنزین مورد بررسی قرار دادند. برای این آزمایش از یک موتور تک سیلندر ۳۹۸ سی سی با سوخت ترکیبی بیواتانول-بنزین استفاده شد. انتشار گازی توسط یک میز انتشار اندازه‌گیری شد و تعداد ذرات توسط دستگاه PPS-M شمارش شد. آزمایش‌ها در شرایط حداکثر فشار تزریق ۵۰ مگاپاسکال و دبی ورودی ثابت با شرایط تزریق مختلف انجام شد. ترکیبات بنزین و بیواتانول، با نسبت مخلوط ۱۰ تا ۵۰ درصد حجمی استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش فشار تزریق و محتوای بیواتانول، تعداد ذرات به ترتیب ۹۳/۶ و ۷۸/۹ درصد کاهش یافت. انتشار تعداد ذرات متناسب با محتوای بیواتانول در مورد تعداد ذرات منتشر شده از فیلم نصب شده روی دیوار است. اثر افزودن بیواتانول با تزریق فشار فوق‌العاده بالای ۳۵ مگاپاسکال روی تعداد ذرات معنی‌دار نیست، زیرا افزایش اتمیزه شدن به دلیل افزایش فشار تزریق اشباع شده است [۲۵].

ایبکوسنا و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای به بررسی اثر مخلوط سوخت حاوی بیواتانول-بنزین با افزودن سیکلوهپتانول اکسیژنه به یک موتور تک سیلندر اشتعال جرقه ای، ۱۵۰ سی سی با تکنولوژی پیش مخلوط در موقعیت درجه گاز ۱۰۰٪ پرداخت. آزمایش‌ها بر روی سوخت‌های حاوی ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد بیواتانول و افزودن سیکلوهپتانول ۰،۵ درصد در هر مخلوط سوخت با تغییرات دور موتور بالای ۴۰۰۰ دور در دقیقه انجام شد. آزمون عملکرد با اتصال موتور به یک دینامومتر انجام شد. نتایج این مطالعه نشان از عملکرد کارآمد بر روی موتور با افزودن مواد افزودنی، و افزایش میانگین ۹ درصدی در توان موتور و ۶ درصدی در گشتاور بود [۲۶].

تحقیقات تجربی برای قضاوت در مورد عملکرد ترکیبات بیواتانول و بنزین، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیر در احتراق سوخت در موتورهای اشتعال جرقه‌ای در تعداد زیادی انجام شده است. مشخص شده است که برای موتورهای اشتعال جرقه ای، بیواتانول دارای مزایایی نظیر عدد اکتان بالا و سرعت احتراق بالا است و دارای معایبی نظیر استارت پذیری دشوار در دمای پایین و ارزش حرارتی پایین است. در همین راستا، محققان بسیاری در جستجوی افزودنی‌هایی برای بهبود کیفیت تأثیر بیواتانول در فرایند اشتعال جرقه‌ای هستند [۲۷،۵]. افزودنی‌ها باید علاوه بر اینکه از بابت هزینه مقرون به صرفه باشند، بایستی از دیدگاه زیست محیطی و تولید انرژی نیز بهبود دهنده فرایند احتراق باشند. یا به عبارتی دیگر باعث تولید پایدار انرژی شوند. اما بعضاً تمام ویژگی‌ها را نمی‌توان در یک افزودنی به دست آورد. بر این اساس، محققان به خصوص در موتورهای دیزل، رو به افزودنی‌های تلفیقی آورده‌اند. این مطالعه تصمیم بر به‌کارگیری از دو نوع افزودنی کم هزینه شامل استون و ان-بوتانول به عنوان افزودنی‌های اکسیژن دار در سوخت بیواتانول برای به‌کارگیری در ترکیبات مختلف با بنزین در فرایند اشتعال جرقه‌ای گرفت. این روند می‌تواند در به دست آوردن ترکیب پایدار از افزودنی‌های بیواتانول برای ترکیب با سوخت اشتعال جرقه‌ای کمک شایانی داشته باشد.

مطابق با بررسی مطالعات انجام شده می‌توان عنوان کرد، محققان بسیاری در راستای تعیین افزودنی‌های سوخت بنزین در تلاش هستند. شاید بتوان به جرعت ادعا کرد دستیابی به هر ترکیب سوخت جدیدی که بتواند تأثیر بسزایی در افزایش عملکرد موتور اشتعال جرقه‌ای و کاهش آلاینده‌گی آن داشته باشد، به عنوان یک نوآوری تحقیق محسوب می‌شود. نوآوری اصلی این پژوهش بررسی اثرات متقابل بیواتانول، استون و ان-بوتانول به عنوان افزودنی‌های سوخت بنزین بر عملکرد و انتشار موتورهای احتراق جرقه‌ای است که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از این افزودنی‌های سوخت جایگزین می‌تواند روشی کم‌هزینه و عملی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهبود امنیت انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

آماده سازی نمونه‌های سوخت

در این پژوهش، از بنزین به عنوان سوخت شاهد و از ان-بوتانول، استون و بیواتانول به عنوان افزودنی‌های سوخت بنزین (در چهار سطح ۰، ۲، ۵ و ۷ درصد) استفاده شد (جدول ۱). هموزنایزر (Polytron® سوئیس) برای تثبیت نمونه سوخت در دمای اتاق به مدت ۱۵ دقیقه استفاده شد. برای هموزن کردن نمونه‌های سوخت از سورفکتانت با ترکیب ۱ به ۲ توئین به اسپین ۸۰ استفاده شد. پایداری نمونه سوخت‌های آماده شده، حاوی غلظت‌های مختلف افزودنی‌ها با قرار دادن نمونه سوخت‌ها در دمای اتاق به مدت ۳۰ روز بدون جابجایی مطابق با روش ارائه شده توسط فیض اله زاده اردبیلی و همکاران (۲۰۲۱) مورد مطالعه قرار گرفت [۲۸]. افزودنی‌های سوخت در طول دوره آزمایشی پایدار بودند و هیچ گونه رسوبی مشاهده نشد. این مشاهده می‌تواند به عنوان یک مزیت عمده فرمول‌های سوخت توسعه یافته در طول این مطالعه در نظر گرفته شود. شایان ذکر است که رسوب افزودنی‌ها در فرمولاسیون‌های مختلف در طول زمان، چالش‌های جدی را برای کاربرد در دنیای واقعی ایجاد می‌کند.

در جدول ۱ جزئیات آماده‌سازی نمونه سوخت برای مقدار نیم لیتر نمونه سوخت ارائه شده است. خواص فیزیکی-شیمیایی نمونه سوخت‌ها، از جمله تأثیرگذارترین پارامترها در عملکرد و انتشار آلاینده‌گی موتور است. از جمله این پارامترها، می‌توان به چگالی، ویسکوزیته، ارزش حرارتی، نقطه اشتعال و نقطه ابری شدن اشاره کرد. در بخش بعدی به نحوه اندازه‌گیری این پارامترها اشاره می‌شود.

جدول ۲ نتایج مربوط به خواص نمونه‌های سوخت را ارائه می‌دهد. مطابق با جدول، ارزش حرارتی نمونه‌های سوخت با اضافه کردن افزودنی‌های سوخت کاهش می‌یابد. زیرا ارزش حرارتی آن-بوتانول، استون و بیواتانول از ارزش حرارتی بنزین کمتر است. از طرفی دیگر، با اضافه کردن افزودنی‌ها به نمونه سوخت حاوی بنزین، ویسکوزیته نمونه سوخت‌ها افزایش می‌یابد. زیرا ویسکوزیته استون، آن بوتانول و بیواتانول بیشتر از بنزین است. شیب این افزایش در نمونه سوخت‌های حاوی آن بوتانول، کمی بیشتر است. با اضافه کردن افزودنی به نمونه سوخت‌ها، مقادیر دانسیته نیز افزایش نسبی می‌یابد.

Table 1- Details of fuel sample preparation for the amount of one liter of fuel
جدول ۱- جزئیات آماده‌سازی نمونه سوخت برای مقدار یک لیتر سوخت

Sample volume (L)	n-Butanol	Aceton	Bioethanol	Gasoline	Order
1000	0	0	0	1000	1
1000	0	0	20	980	2
1000	0	0	50	950	3
1000	0	0	70	930	4
1000	0	0.4	20	979.6	5
1000	0	1	50	949	6
1000	0	1.4	70	928.6	7
1000	0	1	20	979	8
1000	0	2.5	50	947.5	9
1000	0	3.5	70	926.5	10
1000	0	1.4	20	978.6	11
1000	0	3.5	50	946.5	12
1000	0	4.9	70	925.1	13
1000	0.4	0	20	979.6	14
1000	1	0	50	949	15
1000	1.4	0	70	928.6	16
1000	1	0	20	979	17
1000	2.5	0	50	947.5	18
1000	3.5	0	70	926.5	19
1000	1.4	0	20	978.6	20
1000	3.5	0	50	946.5	21
1000	4.9	0	70	925.1	22
1000	0.4	0.4	20	979.2	23
1000	2.5	1	50	946.5	24
1000	4.9	1.4	70	923.7	25
1000	0.4	1	20	978.6	26
1000	2.5	2.5	50	945	27
1000	4.9	3.5	70	921.6	28
1000	0.4	1.4	20	978.2	29
1000	2.5	3.5	50	944	30
1000	4.9	4.9	70	920.2	31

اضافه کردن افزودنی‌ها به سوخت بنزین، باعث افزایش دمای نقطه ابری شدن و کاهش دمای نقطه اشتعال می‌شود. زیرا، دمای نقطه ابری شدن برای استون، ان بوتانول و بیواتانول بالاتر از دمای نقطه ابری شدن و دمای نقطه اشتعال استون، ان بوتانول و بیواتانول کمتر از دمای اشتعال بنزین است. نقطه اشتعال و نقطه ابر دو ویژگی حیاتی نمونه‌های سوخت هستند، به ویژه برای بنزین، دیزل و سایر سوخت‌های مبتنی بر نفت. این ویژگی‌ها به ارزیابی ایمنی، عملکرد و قابلیت استفاده سوخت در کاربردهای مختلف کمک می‌کند.

Table 2- Fuel properties

جدول ۲- خواص سوخت

	Density (g/cm ³)	LHV (Mj/kg)	Flash point (°C)	Viscosity (cSt)	Cloud point (°C)
1	0.72	32.321	87.0	0.743	0
2	0.73	32.082	86.3	0.743	1.06
3	0.75	31.755	86.2	0.745	2.65
4	0.76	31.537	86.2	0.746	3.71
5	0.74	32.659	86.1	0.759	1.06
6	0.76	32.312	86.1	0.760	2.65
7	0.77	32.081	86.0	0.760	3.71
8	0.75	33.524	86.1	0.782	1.06
9	0.76	33.149	85.9	0.782	2.65
10	0.78	32.898	85.9	0.782	3.71
11	0.76	34.101	86.9	0.797	1.06
12	0.77	33.706	86.7	0.797	2.65
13	0.78	33.443	86.5	0.797	3.71
14	0.78	32.607	86.2	0.759	1.74
15	0.80	32.260	86.7	0.760	3.33
16	0.81	32.029	86.6	0.761	4.39
17	0.86	33.394	86.4	0.783	2.76
18	0.88	33.019	86.3	0.783	4.35
19	0.89	32.768	86.2	0.784	5.41
20	0.91	33.919	86.1	0.799	3.44
21	0.93	33.524	86.2	0.799	5.03
22	0.94	33.261	86.0	0.799	6.09
23	0.79	33.184	85.9	0.775	1.74
24	0.88	33.576	86.0	0.798	4.35
25	0.94	33.806	86.5	0.813	6.09
26	0.80	34.049	86.3	0.798	1.74
27	0.89	34.413	86.2	0.821	4.35
28	0.95	34.623	86.3	0.835	6.09
29	0.81	34.626	86.1	0.813	1.74
30	0.90	34.971	85.9	0.836	4.35
31	0.96	35.168	86.1	0.850	6.09

انجام آزمون موتور

برای انجام این پژوهش از موتور تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای بکار گرفته شد (جدول ۳). در این پژوهش برای اندازه‌گیری گشتاور و محاسبه توان ترمزی از دینامومتر استفاده شد. وظیفه اصلی هر دینامومتر اعمال بار کنترل شده بر تجهیز مورد آزمون از جمله موتور است. همچنین دینامومتر با اندازه‌گیری گشتاور می‌تواند اطلاعات لازم برای محاسبه توان ترمزی را به کاربر ارائه دهد. گشتاور و توان تولیدی موتور از مشخصه‌های مهم در بررسی یک موتور است. برای بارگذاری موتور، بار در قالب جریان الکتریکی توسط مقاومت متغیر با اتصال یک مصرف کننده جریان متناوب انجام گرفت. در این سیستم، دینامومتر به وسیله کولپینگ به موتور متصل می‌شود و موتور دینامومتر را به چرخش در می‌آورد.

Table 3- Spark ignition engine specifications

جدول ۳- مشخصات موتور اشتعال جرقه‌ای

Company-type	Loncin 4 stroke single cylinder
Power	6 hp
Fuel	Gasoline
Volume	0.2 L
Cooling system	Air cooling
Weight	20 kg

برای انجام آزمون موتور در ابتدا سرویس کامل موتور تک سیلندر بنزینی صورت گرفت و این سرویس شامل تعویض روغن، تعویض تسمه، تعویض واشر نسوز آگزوز و پیچ‌های حاوی آن، تعویض و جایگزین کردن شلنگ‌های رفت از منبع سوخت تا ورودی به موتور، تعویض و جایگزین کردن شلنگ‌های متصل به مانومتر، تنظیم دور موتور و تنظیمات مربوط به برد دیجیتال انجام شد سپس موتور به مدت نیم ساعت جهت گرم شدن و آماده‌سازی برای انجام آزمون، تحت بار ۱۰۰ درصد صورت گرفت. آنالیزر بکار رفته شده در این پژوهش بنام سیترون، ساخت کشور آلمان است. این وسیله با مدل S6000-6DSC Six Gas & Emissions Analyzer یک آنالیزر گاز تجاری و صنعتی است که ابزاری برای نظارت بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و نگهداری و تنظیم فرآیندهای احتراق از جمله بویلرها، مشعل‌ها، موتورهای گازی و دیزلی، توربین‌ها، کوره‌ها، بخاری‌ها و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی طراحی شده است. ویژگی‌های این وسیله عبارتند از:

- اندازه‌گیری اکسیژن (O_2)، مونوکسید کربن (CO)، اکسید نیتریک (NO)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، NO_2 ، دی اکسید گوگرد (SO_2)، C_xH_y/HC و محاسبه دی اکسید کربن (دی اکسید کربن)
- پمپ رقیق‌سازی برای اندازه‌گیری محدوده خودکار CO تا ۵۰۰۰۰ ppm
- محاسبات راندمان، هوای اضافی و دی اکسید کربن
- انباشته گاز و اندازه‌گیری دمای هوا

جدول ۴ مقادیر دقت و عدم قطعیت را برای موارد مورد محاسبه ارائه می‌دهد.

Table 4- Accuracy and uncertainty values

جدول ۴- مقادیر دقت و عدم قطعیت

Parameter	Accuracy	Resolution	Parameter	Uncertainty	Percentage uncertainty (%)
Engine load	±1	0.1 N	F flow rate	0.31 (g/h)	4.20
Engine speed	±1	1 rpm	Air flow rate	0.964 (g/h)	4
UHC	±1	1 ppm	BP	0.047 (kW)	0.001
CO ₂	±1	0.1 %	BSFC	0.179 (g/kWh)	1.015
NO _x	±1	1 ppm			
CO	±1	1 ppm			
O ₂	±1	0.1 %			
Temperature	± 0.35	1 °C			

نمونه سوخت‌های آماده شده داخل بطری‌های یک لیتری ریخته شدند سپس به‌طور تجربی در یک موتور احتراق جرقه‌ای تک سیلندر چهار زمانه، مورد آزمون قرار گرفتند. در این تحقیق به‌منظور استفاده از نمونه سوخت‌ها موتور تک سیلندر با یک ژنراتور ۵ کیلووات ساعت کوپل شد، و همچنین اندازه‌گیری میزان سوخت مصرفی با تعبیه‌ی یک مجرای مجزا در پشت کاربراتور، و تعبیه یک شیر در مسیر انتقال سوخت، تلاش بر ایجاد کنترل روی سوخت مصرفی شد. به این صورت که سوخت از یک مخزن مجزا و با عبور از یک لوله شیشه‌ای مدرج به روش جابجایی قابلیت اندازه‌گیری داشت و همچنین توسط مخزن اولیه و شیر تعبیه شده، هر لحظه می‌توانستیم به سوخت شاهد دسترسی پیدا کنیم. برای تحت بار قرار دادن موتور از یک مقاومت متغییر نوع TDGC2-5kVA و یک هیتر 1 kW استفاده شد. با اندازه‌گیری توان موتور مقدار آمپر و ولتاژ برق اندازه‌گیری شد (حاصل ضرب آمپر و ولتاژ برق مستقیم (DC) نشان‌دهنده میزان توان مصرفی است). شکل ۱ فلوچارت مربوط به انجام روش آزمون موتور را ارائه می‌دهد.

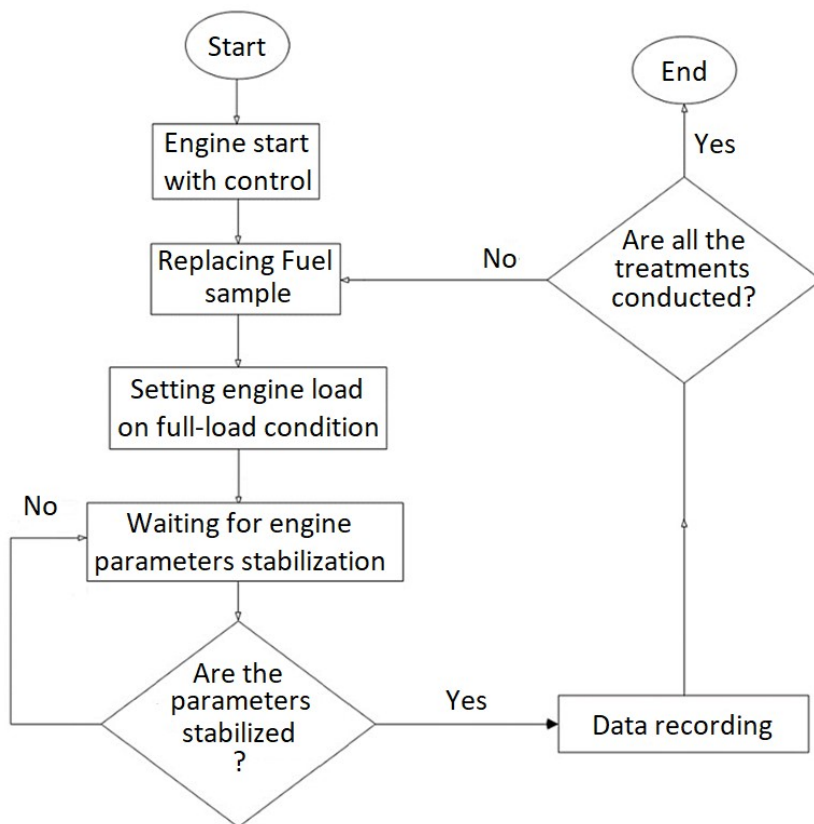


Figure 1- Engine test flowchart
 شکل ۱- فلوچارت انجام آزمون موتور

در ادامه برای محاسبه گشتاور از معادله (۱) استفاده شد. بر اساس این رابطه، گشتاور عبارتست از حاصل ضرب نیرو در فاصله عمودی نیروسنج تا مرکز دوران. در این معادله T عبارتست از گشتاور تولید شده توسط موتور در چرخ لنگر (N.m)، F برآیند نیروهای وارده بر حسب (N) و R فاصله گریز از مرکز میل لنگ به (m).

$$T = F \times R \quad (1)$$

برای محاسبه توان ترمزی که همان توان موجود در چرخ لنگر است، از معادله (۲) استفاده شد. در این معادله P عبارتست از توان ترمزی بر حسب کیلووات، T گشتاور بر حسب نیوتون متر و n دور موتور بر حسب دور بر دقیقه است.

$$P = \frac{2\pi Tn}{60000} = \frac{Tn}{9550} \quad (2)$$

بازدهی حرارتی ترمزی نیز یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد موتور تلقی می‌شود. این پارامتر با استفاده از معادله (۳) محاسبه شد:

$$BTE(\%) = \frac{BP}{LHV \times mf} \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه، BTE بازده حرارتی ترمزی بر حسب درصد، LHV مقدار محتوای انرژی سوخت بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم، BP توان ترمزی موتور بر حسب کیلووات و mf مصرف سوخت بر حسب گرم بر ثانیه است. بخش بعدی به ارائه نتایج تجربی به دست آمده از آزمون موتور می‌پردازد.

مصرف سوخت ویژه ترمزی یکی دیگر از پارامترهای عملکردی موتور تلقی می‌شود. برای محاسبه این پارامتر از معادله (۴) استفاده شد:

$$BSFC\left(\frac{g}{kWh}\right) = \frac{mf}{BP} \quad (4)$$

در این رابطه BP توان ترمزی موتور بر حسب کیلووات و mf مصرف سوخت بر حسب گرم بر ثانیه است.

انجام آنالیز آماری

برای انجام آنالیز آماری از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. در این نرم‌افزار با به‌کارگیری روش آنالیز واریانس (ANOVA)، متغیرهای مستقل (شامل مقادیر بنزین، بیواتانول، استون و ان-بوتانول که همان ترکیب سوخت است) در مقابل متغیرهای وابسته (شامل مقادیر پارامترهای عملکردی و آلایندگی موتور بنزینی) قرار گرفته شدند. این روش در راستای بررسی معنی‌داری یا عدم معنی‌داری تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته انجام گرفت.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج تجربی و ارزیابی عملکرد و آلایندگی موتور بنزینی در حضور نمونه‌های سوخت ارائه می‌شود. این بخش به ارائه نتایج مربوط به آنالیز آماری می‌پردازد. در بخش دوم نتایج مربوط به عملکرد موتور و در بخش سوم نتایج مربوط به آلایندگی موتور ارائه می‌شود.

نتایج آنالیز واریانس

جداول ۵ تا ۸ به ترتیب نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای بررسی معنی‌داری تأثیر درصد بنزین، درصد بیواتانول، درصد استون و درصد ان بوتانول در پارامترهای عملکردی و آلایندگی موتور بنزینی را ارائه می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده از آنالیز واریانس متغیرهای وابسته و مستقل (جداول ۵ تا ۸)، می‌توان عنوان کرد تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته از لحاظ آماری معنی‌دار می‌باشند. بر این اساس می‌توان تأثیر آن‌ها را مورد بررسی قرار داد.

مطابق با نتایج به دست آمده از جدول ۵، می توان مشاهده کرد تأثیر محتوای بنزین در نمونه سوخت ها در پارامترهای عملکردی موتور (شامل توان ترمزی، بازده حرارتی ویژه ترمزی، و مصرف سوخت ویژه ترمزی) و آلاینده‌گی موتور (شامل انتشار اکسیژن، انتشار دی اکسیدکربن، انتشار مونوکسیدکربن، انتشار اکسیدهای نیتروژن و انتشار مونوکسید نیتروژن) در سطح احتمال یک درصد معنی دار است.

مطابق با جدول ۶ می توان مشاهده کرد، تأثیر درصد بیواتانول تنها در مقادیر بازدهی حرارتی ویژه ترمزی، انتشار اکسیژن، انتشار اکسیدهای نیتروژن و انتشار مونوکسید نیتروژن در سطح احتمال یک درصد معنی دار است. این در حالی است که تأثیر بیواتانول در مقادیر تولید توان ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی در سطح احتمال پنج درصد معنی دار بوده و در انتشار دی اکسیدکربن عدم معنی داری را نشان می دهد.

مطابق با جدول ۷ و ۸ می توان مشاهده کرد تأثیر مقادیر استون و ان-بوتانول در مقادیر تولید توان ترمزی و بازدهی حرارتی ترمزی و همچنین انتشار آلاینده های موتور بنزینی در سطح احتمال یک درصد معنی دار است. بررسی معنی داری یا عدم معنی داری تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته باعث انجام دقیق تر و قابل اعتمادتر آنالیزها و تحلیل های تجربی می شود.

Table 5- The results of analysis of variance to investigate the effect of gasoline on gasoline engine performance and emissions
جدول ۵- نتایج ارزیابی آنالیز واریانس برای بررسی تأثیر بنزین در عملکرد و آلاینده‌گی های موتور بنزین

			Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
BP*G	Between Groups	(Combined)	.185	19	.010	11.559	.000
	Within Groups		.192	11	.017		
	Total		.377	30			
BTE*G	Between Groups	(Combined)	.024	19	.001	7.900	.000
	Within Groups		.015	11	.001		
	Total		.039	30			
BSFC*G	Between Groups	(Combined)	.012	19	.001	8.191	.000
	Within Groups		.006	11	.001		
	Total		.018	30			
O2*G	Between Groups	(Combined)	31.856	19	1.677	9.407	.000
	Within Groups		45.353	11	4.123		
	Total		77.210	30			
CO2*G	Between Groups	(Combined)	155.060	19	8.161	10.130	.000
	Within Groups		79.414	11	7.219		
	Total		234.474	30			
CO*G	Between Groups	(Combined)	6.18E+08	19	3.25E+07	4.213	.008
	Within Groups		8.10E+07	11	7.37E+06		
	Total		6.99E+08	30			
NOx*G	Between Groups	(Combined)	2.34E+04	19	1.23E+03	4.761	.005
	Within Groups		7690.243	11	699.113		
	Total		31079.038	30			
NO*G	Between Groups	(Combined)	2872.924	19	151.207	4.290	.006
	Within Groups		5743.102	11	522.100		
	Total		8616.025	30			

نتایج آزمون عملکرد موتور بنزینی

این بخش با ارائه سه پارامتر عملکردی شامل توان ترمزی، بازده حرارتی ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی در صدد بررسی تأثیر نمونه های سوخت بر عملکرد موتور بنزینی است. شکل ۲ تا ۴ به ترتیب نتایج تأثیر نمونه سوخت ها بر توان ترمزی، بازده حرارتی ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی را ارائه می دهد.

Table 6- Analysis of variance evaluation results to investigate the effect of bioethanol on gasoline engine performance and emissions

جدول ۶- نتایج ارزیابی آنالیز واریانس برای بررسی تأثیر بیواتانول در عملکرد و آلاینده‌گی‌های موتور بنزین

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
BP*B	Between Groups (Combined)	.019	3	.006	3.473	.013
	Within Groups	.358	27	.013		
	Total	.377	30			
BTE*B	Between Groups (Combined)	.001	3	.000	4.200	.007
	Within Groups	.039	27	.001		
	Total	.039	30			
BSFC*B	Between Groups (Combined)	.000	3	.000	3.195	.016
	Within Groups	.018	27	.001		
	Total	.018	30			
O2*B	Between Groups (Combined)	5.066	3	1.689	3.632	.009
	Within Groups	72.144	27	2.672		
	Total	77.210	30			
CO2*B	Between Groups (Combined)	7.748	3	2.583	.308	.820
	Within Groups	226.726	27	8.397		
	Total	234.474	30			
CO*B	Between Groups (Combined)	8.51E+07	3	2.84E+07	3.248	.015
	Within Groups	6.14E+08	27	2.27E+07		
	Total	6.99E+08	30			
NOx*B	Between Groups (Combined)	1417.359	3	472.453	4.430	.006
	Within Groups	29661.679	27	1098.581		
	Total	31079.038	30			
NO*B	Between Groups (Combined)	455.958	3	151.986	12.503	.000
	Within Groups	8160.067	27	302.225		
	Total	8616.025	30			

Table 7- Analysis of variance evaluation results to investigate the effect of acetone on gasoline engine performance and emissions

جدول ۷- نتایج ارزیابی آنالیز واریانس برای بررسی تأثیر استون در عملکرد و آلاینده‌گی‌های موتور بنزین

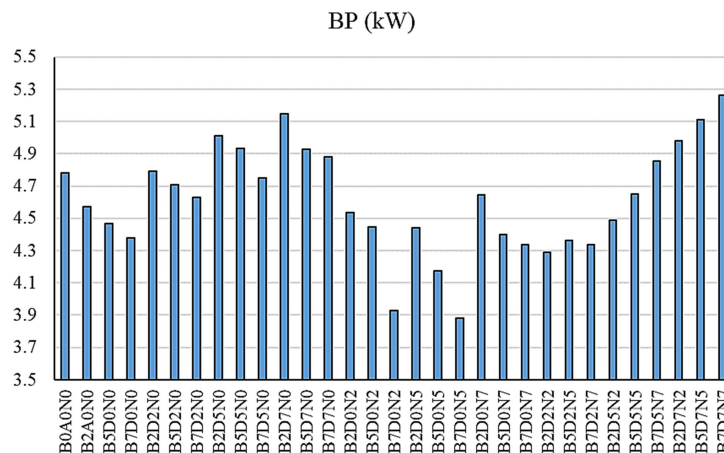
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
BP*A	Between Groups (Combined)	.229	3	.076	13.964	.000
	Within Groups	.148	27	.005		
	Total	.377	30			
BTE*A	Between Groups (Combined)	.000	3	.000	5.052	.003
	Within Groups	.039	27	.001		
	Total	.039	30			
BSFC*A	Between Groups (Combined)	.001	3	.000	.293	.830
	Within Groups	.018	27	.001		
	Total	.018	30			
O2*A	Between Groups (Combined)	13.438	3	4.479	3.897	.010
	Within Groups	63.771	27	2.362		
	Total	77.210	30			
CO2*A	Between Groups (Combined)	4.566	3	1.522	4.179	.008
	Within Groups	229.908	27	8.515		
	Total	234.474	30			
CO*A	Between Groups (Combined)	6.64E+07	3	2.21E+07	3.945	.009
	Within Groups	6.32E+08	27	2.34E+07		
	Total	6.99E+08	30			
NO*A	Between Groups (Combined)	1753.188	3	584.396	3.299	.012
	Within Groups	6862.837	27	254.179		
	Total	8616.025	30			

Table 8- Analysis of variance evaluation results to investigate the effect of n-butanol on gasoline engine performance and emissions
جدول ۸- نتایج ارزیابی آنالیز واریانس برای بررسی تأثیر آن - بوتانول در عملکرد و آلاینده‌های موتور بنزین

			Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
BP*n	Between Groups	(Combined)	.074	3	.025	6.214	.001
	Within Groups		.302	27	.011		
	Total		.377	30			
BTE*n	Between Groups	(Combined)	.029	3	.010	26.545	.000
	Within Groups		.010	27	.000		
	Total		.039	30			
BSFC*n	Between Groups	(Combined)	.014	3	.005	25.996	.000
	Within Groups		.005	27	.000		
	Total		.018	30			
O2*n	Between Groups	(Combined)	44.576	3	14.859	12.294	.000
	Within Groups		32.633	27	1.209		
	Total		77.210	30			
CO2*n	Between Groups	(Combined)	172.405	3	57.468	24.999	.000
	Within Groups		62.069	27	2.299		
	Total		234.474	30			
CO*n	Between Groups	(Combined)	4.01E+08	3	1.34E+08	12.101	.000
	Within Groups		2.98E+08	27	1.10E+07		
	Total		6.99E+08	30			
NOx*n	Between Groups	(Combined)	22780.152	3	7593.384	24.705	.000
	Within Groups		8298.886	27	307.366		
	Total		31079.038	30			
NO*n	Between Groups	(Combined)	5431.908	3	1810.636	15.353	.000
	Within Groups		3184.117	27	117.930		
	Total		8616.025	30			

بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۲ می‌توان عنوان کرد افزودن بیواتانول به نمونه‌های سوخت موجب کاهش نسبی توان موتور شده است. افزودن بیواتانول به بنزین می‌تواند توان ترمزی را در موتور بنزینی کاهش دهد که در درجه اول به دلیل تفاوت در محتوای انرژی و ویژگی‌های احتراق است. بیواتانول زیستی حاوی انرژی کمتری در واحد حجم در مقایسه با بنزین است و بیواتانول حدود ۳۴ درصد انرژی کمتری در هر گالن (یا لیتر) دارد. هنگامی که بیواتانول با بنزین مخلوط می‌شود، مخلوط سوخت به دست آمده چگالی انرژی کلی کمتری دارد. این بدان معنی است که برای همان حجم سوخت مصرفی، موتور انرژی کمتری استخراج می‌کند و در نتیجه توان خروجی کاهش می‌یابد. برای جبران این روند، موتورها ممکن است نیاز به سوزاندن حجم بیشتری از ترکیب اتانول- بنزین برای حفظ همان سطوح قدرت داشته باشند که می‌تواند منجر به افزایش مصرف سوخت نیز شود. این روند می‌تواند مصرف سوخت ویژه ترمزی را نیز افزایش دهد که در شکل ۴ کاملاً مشهود است. این روند همچنین می‌تواند موجب کاهش بازده حرارتی ترمزی موتور بنزینی شود که در شکل ۳ مشهود است.

علاوه بر این، بیواتانول دارای ویژگی‌های احتراق متفاوتی در مقایسه با بنزین است. برای احتراق کارآمد به مخلوط هوا و سوخت متفاوتی نیاز دارد و رتبه اکتان بالاتر آن می‌تواند بر زمان‌بندی و کارایی موتور تأثیر بگذارد. زمانی که بیواتانول با بنزین مخلوط می‌شود، ممکن است نیاز باشد که زمان تحویل سوخت و احتراق موتور برای مطابقت با نیازهای جدید سوخت هوا و هوا تنظیم شود. اگر این تنظیمات انجام نشوند، موتور ممکن است کارایی کمتری داشته باشد که منجر به کاهش توان خروجی شده و به‌طور بالقوه بر عملکرد کلی تأثیر می‌گذارد. بنابراین، در حالی که بیواتانول می‌تواند یک گزینه سوخت سازگار با محیط زیست باشد، محتوای انرژی و ویژگی‌های احتراق کمتر آن می‌تواند تأثیر منفی بر توان ترمزی یک موتور بنزینی داشته باشد، اگر موتور به درستی تنظیم یا طراحی نشده باشد که آن را در خود جای دهد.

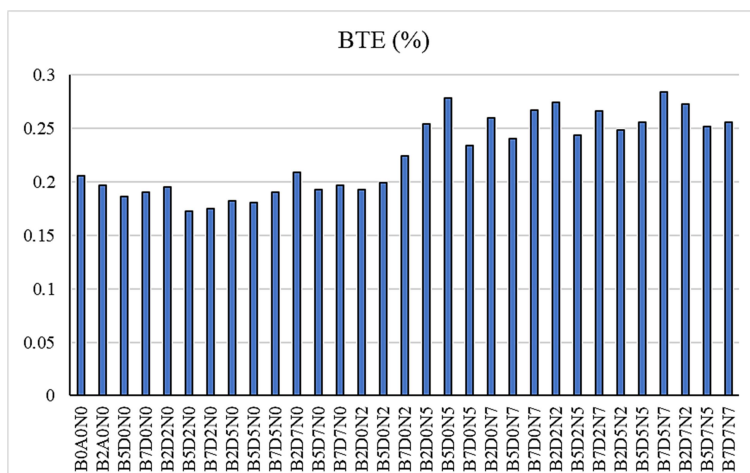


شکل ۲- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر توان ترمزی موتور بنزینی

Figure 2- The effect of fuel samples on the braking power of gasoline engine

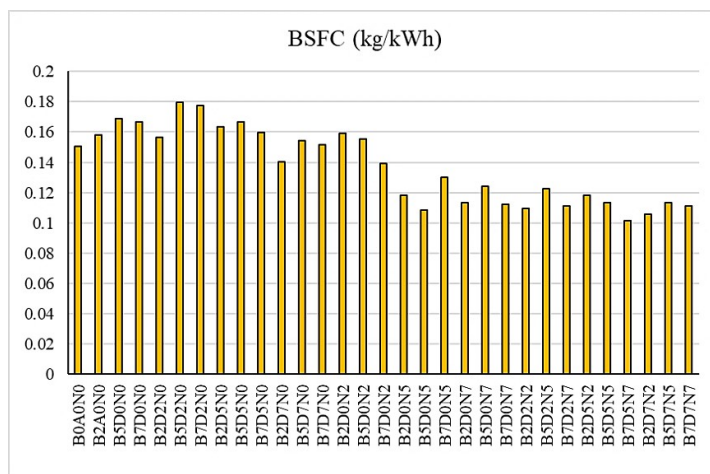
مطابق با شکل ۲ همچنین افزودن استون در نمونه سوخت‌ها میزان توان ترمزی را نسبت به افزودنی بیواتانول کمی افزایش می‌دهد همچنین افزودن آن در درصدهای بالا نسبت به سوخت بنزین افزایش می‌دهد. این روند همچنین در میزان بازدهی حرارتی ترمزی موتور موجب افزایش (شکل ۳) و در مصرف سوخت ویژه ترمزی نیز موجب کاهش مصرف سوخت (شکل ۴) شود.

مطابق با شکل ۲ افزودن آن بوتانول از ۲ تا ۵ درصد به طور نسبی موجب کاهش و از ۵ تا ۷ درصد موجب افزایش نسبی توان ترمزی شده است. در حالت کلی کمترین میزان توان ترمزی در محدوده افزودنی‌های تلفیقی بیواتانول و آن بوتانول فاقد استون به دست آمده است که در حالت کلی حدود ۱۷ درصد کمتر از نمونه شاهد است. بالاترین میزان توان ترمزی در بالاترین درصد تلفیق افزودنی‌های آن بوتانول، استون و بیواتانول در نمونه سوخت بنزین به دست آمده است که در حدود ۱۱ درصد بیشتر از نمونه سوخت شاهد است. در این بازه نیز، بازده حرارتی نیز نسبت به نمونه سوخت شاهد بالاتر (شکل ۳) و مصرف سوخت ویژه ترمزی نیز نسبت به نمونه سوخت شاهد کمتر (شکل ۴) است.



شکل ۳- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر بازده حرارتی ترمزی موتور بنزینی

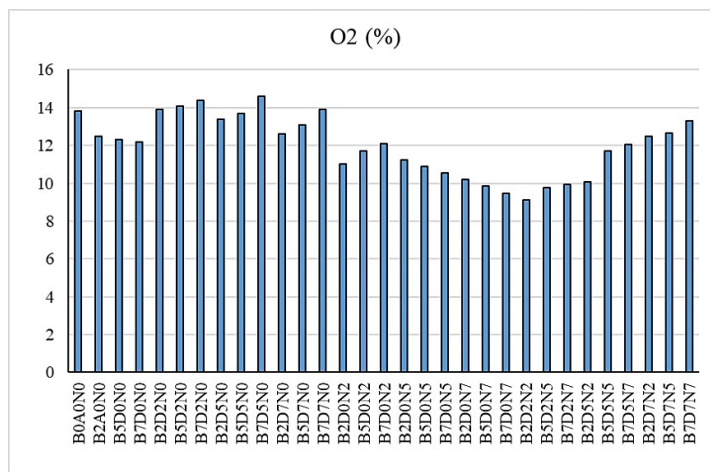
Figure 3- Effect of fuel samples on braking thermal efficiency of gasoline engine



شکل ۴- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور بنزینی
 Figure 4- The effect of fuel samples on the fuel consumption of gasoline engine braking

نتایج آزمون آلاینده‌ی موتور بنزینی

در این بخش آزمون آلاینده‌ی موتور با ارائه تأثیر نمونه سوخت‌ها در انتشار اکسیژن، دی اکسیدکربن، مونوکسیدکربن، مونوکسید نیتروژن، و اکسیدهای نیتروژن به ترتیب در شکل‌های ۵ تا ۹ همراه است.



شکل ۵- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر انتشار اکسیژن موتور بنزینی
 Figure 5- The effect of fuel samples on gasoline engine oxygen emissions

مطابق با شکل ۵، انتشار اکسیژن در نمونه سوخت‌های حاوی افزودنی تلفیقی بیواتانول و استون بالاترین میزان انتشار و افزودنی‌های حاوی افزودنی‌های تلفیقی بیواتانول و آن بوتانول کمترین میزان انتشار است. یکی از دلایل اصلی انتشار بالای اکسیژن، محتوای اکسیژن نمونه سوخت‌ها و دیگری کیفیت احتراق است.

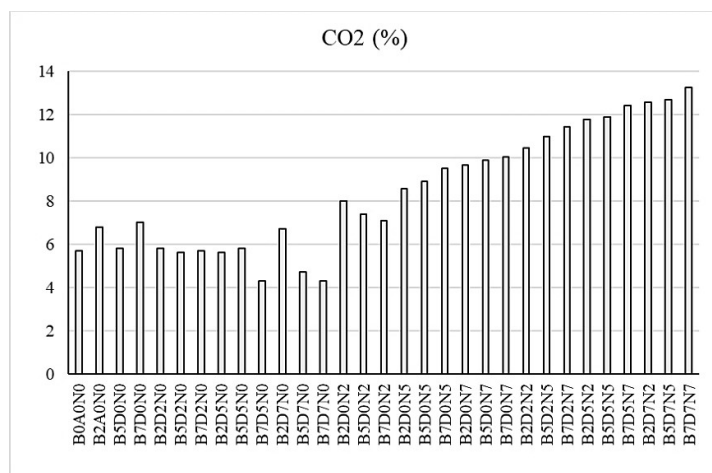
انتشار بیشتر اکسیژن در آگروز یک موتور بنزینی معمولاً نشان دهنده احتراق ناقص، مصرف ناکارآمد سوخت یا مشکلات سیستم‌های کنترل موتور است. یکی از دلایل متداول افزایش انتشار اکسیژن، مخلوط ناقص هوا و سوخت است. یک مخلوط ناقص حاوی هوای بیشتر و سوخت کمتری نسبت به نسبت استوکیومتری ایده‌آل است که می‌تواند ناشی از مشکلاتی مانند

معیوب بودن سنسور اکسیژن، نشت خلاء در سیستم ورودی، یا مشکلات سیستم تزریق سوخت باشد. هنگامی که مخلوط بیش از حد ضعیف است، اکسیژن اضافی در محفظه احتراق وجود دارد که منجر به احتراق ناقص و سطوح بالاتر اکسیژن در گازهای خروجی می‌شود.

یکی دیگر از عوامل موثر در انتشار اکسیژن بیشتر می‌تواند مشکلات مربوط به اشتعال باشد. زمان جرعه زنی نادرست یا جرعه ضعیف می‌تواند منجر به احتراق ناکارآمد شود و باعث شود اکسیژن نسوخته از موتور عبور کند و به سیستم اگزوز منتقل شود. برای تکمیل این ادعا، بایستی از پارامتر دیگری که می‌توان کیفیت احتراق را اندازه‌گیری کند، استفاده کرد (دی اکسید کربن شکل ۶).

شکل ۶ میزان انتشار دی اکسید کربن نمونه‌های سوخت را ارائه می‌دهد. بالا بودن انتشار دی اکسید کربن در نمونه سوخت‌ها نشان از بالا بودن کیفیت احتراق و تولید دی اکسید کربن بالا است. همانطور که مشخص است، در نمونه سوخت‌های حاوی افزودنی‌های تلفیقی استون، ان بوتانول و بیواتانول در بنزین میزان انتشار دی اکسید کربن بالا تر رفته است. همانطور که مشخص است، در حضور افزودنی‌های دوتایی استون و بیواتانول یا فقط بیواتانول در سوخت بنزین، میزان انتشار دی اکسید کربن نسبتاً کم است. با افزودن ان بوتانول در نمونه سوخت‌ها، میزان انتشار دی اکسید کربن افزایش یافته است که در حالت افزودنی‌های سه تایی در بنزین به بالاترین میزان انتشار خود رسیده است.

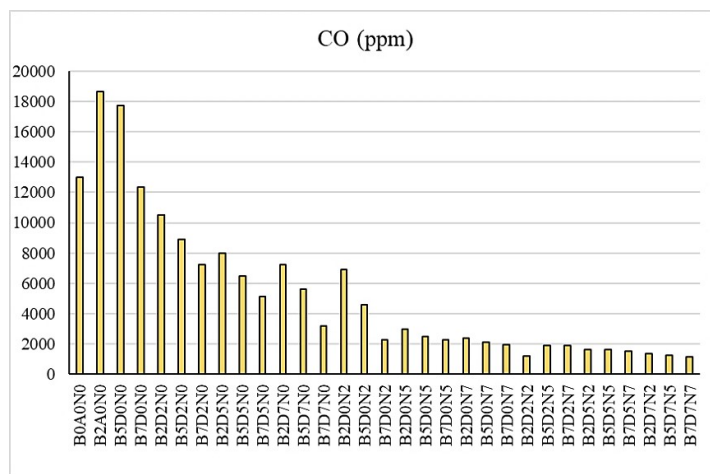
شکل ۷ میزان انتشار مونوکسید کربن را ارائه می‌دهد. با افزایش مونوکسید کربن، کیفیت احتراق به سمت احتراق ناقص سوق پیدا می‌کند. همانطور که از شکل ۷ مشخص است، با افزودن ان بوتانول در افزودنی‌های بیواتانول و افزودنی‌های دوتایی بیواتانول-استون میزان انتشار مونوکسید کربن موتور بنزینی کاهش یافته است. این روند نسبت کاملاً عکس با روند انتشار دی اکسید کربن دارد (شکل ۶). با مقایسه روند انتشار دی اکسید کربن و مونوکسید کربن می‌توان عنوان کرد، حضور ان-بوتانول موجب بهبود کیفیت احتراق شده است. بهبود کیفیت احتراق در افزودنی‌های سه تایی بیشتر است.



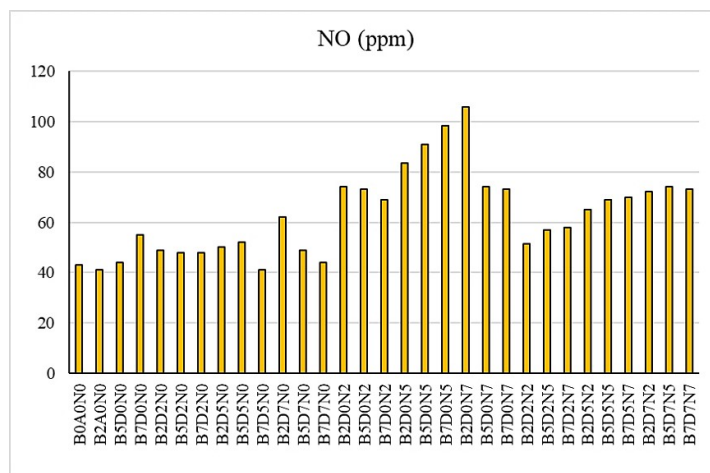
شکل ۶- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر انتشار دی اکسید کربن موتور بنزینی

Figure 6- The effect of fuel samples on the emission of carbon dioxide from gasoline engines

شکل ۸ مقادیر انتشار مونوکسید نیتروژن را در حضور نمونه‌های سوخت ارائه می‌دهد. بالاترین میزان انتشار مونوکسید نیتروژن به طور نسبی در نمونه سوخت‌های حاوی افزودنی‌های تلفیقی بیواتانول و ان-بوتانول است. از طرفی دیگر کمترین میزان انتشار مونوکسید نیتروژن در نمونه سوخت‌های حاوی تلفیق بیواتانول و استون رخ می‌دهد.

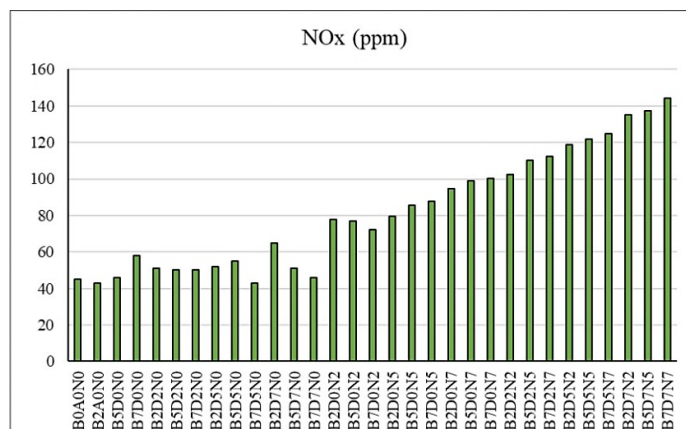


شکل ۷- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر انتشار مونواکسید کربن موتور بنزینی
 Figure 7- Effect of fuel sample on carbon monoxide emission of gasoline engine



شکل ۸- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر مونواکسید نیتروژن موتور بنزینی
 Figure 8- The effect of fuel samples on nitrogen monoxide of gasoline engine

شکل ۹ میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن را ارائه می‌دهد. میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن، ارتباط مستقیمی با دمای محفظه احتراق دارد. هرچه دمای محفظه احتراق افزایش یابد، میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن افزایش می‌یابد. همانطور که از شکل ۹ مشخص است با افزودن ان بوتانول به نمونه‌های سوخت، میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن افزایش می‌یابد. این افزایش در نمونه سوخت‌های حاوی افزودنی‌های دوتایی بیواتانول-استون در سوخت بنزین بیشتر از سایر نمونه سوخت‌ها است (به طور متوسط حدود ۷۵ درصد بالاتر از نمونه سوخت شاهد). در این نمونه سوخت‌ها، میزان توان ترمزی نیز بالاتر از نمونه سوخت شاهد (شکل ۲) است. در این نمونه سوخت‌ها، با افزایش توان، فشار داخل محفظه احتراق نیز افزایش می‌یابد. با افزایش فشار داخل محفظه احتراق، دمای احتراق نیز افزایش می‌یابد و می‌تواند میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن در اگروز را افزایش دهد.



شکل ۹- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر اکسیدهای نیتروژن موتور بنزینی
Figure 9- Effect of fuel sample on nitrogen oxides of gasoline engine

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثرات دوگانه و سه گانه افزودنی‌های استون، بیواتانول و ان- بوتانول در نمونه سوخت بنزین (به عنوان نمونه سوخت شاهد) مورد بررسی و آزمون قرار گرفت. افزودن بیواتانول در حالت کلی موجب کاهش عملکرد موتور بنزینی می‌شود. در این تحقیق با به کارگیری افزودنی‌های سه گانه سعی در کاهش تأثیرات سو افزودنی بیواتانول شد. در حالت کلی می‌توان نتایج زیر را ارائه داد:

- براساس نتایج به دست آمده از آنالیز واریانس متغیرهای وابسته و مستقل، می‌توان عنوان کرد تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته از لحاظ آماری معنی دار می‌باشند.
- افزودن بیواتانول به نمونه‌های سوخت موجب کاهش نسبی توان موتور می‌شود.
- افزودن بیواتانول به بنزین می‌تواند توان ترمزی را در موتور بنزینی کاهش دهد.
- افزودن بیواتانول به بنزین منجر به افزایش مصرف سوخت موتور بنزینی می‌شود.
- افزودن استون در نمونه سوخت‌ها میزان توان ترمزی را نسبت به افزودنی بیواتانول و سوخت بنزین به‌طور نسبی افزایش می‌دهد.
- افزودن استون به نمونه سوخت‌ها میزان بازدهی حرارتی ترمزی موتور موجب افزایش و مصرف سوخت ویژه ترمزی را کاهش می‌دهد.
- افزودن ان بوتانول از ۲ تا ۵ درصد به طور نسبی موجب کاهش و از ۵ تا ۷ درصد موجب افزایش نسبی توان ترمزی می‌شود.
- کمترین میزان توان ترمزی در محدوده افزودنی‌های تلفیقی بیواتانول و ان بوتانول فاقد استون به دست می‌آید.
- بالاترین میزان توان ترمزی در بالاترین درصد تلفیق افزودنی‌های ان بوتانول، استون و بیواتانول در نمونه سوخت بنزین به دست می‌آید. در این بازه، بازده حرارتی نیز نسبت به نمونه سوخت شاهد بالاتر و مصرف سوخت ویژه ترمزی نیز نسبت به نمونه سوخت شاهد کمتر است.
- انتشار اکسیژن در نمونه سوخت‌های حاوی افزودنی تلفیقی بیواتانول و استون بالاترین میزان انتشار و در افزودنی‌های حاوی افزودنی‌های تلفیقی بیواتانول و ان بوتانول کمترین میزان انتشار است.
- در نمونه سوخت‌های حاوی افزودنی‌های تلفیقی استون، ان بوتانول و بیواتانول در بنزین میزان انتشار دی‌اکسیدکربن بالا است.

- در حضور افزودنی‌های دوتایی استون و بیواتانول یا فقط بیواتانول در سوخت بنزین، میزان انتشار دی اکسیدکربن نسبتاً کم است.
 - با افزایش مونوکسیدکربن، کیفیت احتراق به سمت احتراق ناقص سوق پیدا می‌کند.
 - بالاترین میزان انتشار مونوکسید نیتروژن به طور نسبی در نمونه سوخت‌های حاوی افزودنی‌های تلفیقی بیواتانول و ان-بوتانول است.
 - کمترین میزان انتشار مونوکسید نیتروژن در نمونه سوخت‌های حاوی تلفیق بیواتانول و استون رخ می‌دهد.
 - با افزودن ان بوتانول به نمونه‌های سوخت، میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن افزایش می‌یابد.
- بررسی اثرات متقابل بیواتانول، استون و ان-بوتانول به عنوان افزودنی‌های سوخت بنزین بر عملکرد و انتشار موتور اشتعال جرقه‌ای بینش‌های ارزشمندی را در مورد فعل و انفعالات پیچیده در فرآیند احتراق موتور ارائه می‌کند. این مطالعه نشان داده است که انتخاب مواد افزودنی سوخت می‌تواند به طور قابل توجهی بر عملکرد موتور و آلایندگی تأثیر بگذارد. بیواتانول، به عنوان یک سوخت تجدید پذیر و اکسیژن دار، موجب افزایش انتشار مونوکسید کربن (CO) شده است. در حالی که استون و ان-بوتانول ممکن است بر ویژگی‌های احتراق تأثیر بگذارد. با این حال، نتایج همچنین نشان می‌دهد که اثرات این افزودنی‌ها می‌تواند به شدت به طراحی موتور، شرایط عملیاتی و نسبت‌های ترکیب خاص مورد استفاده وابسته باشد.
- این تحقیق راه را برای چندین جهت تحقیقاتی آینده در زمینه افزودنی‌های سوخت جایگزین و موتورهای اشتعال جرقه‌ای هموار می‌کند. اولاً، مطالعات بیشتر باید بر روی بهینه‌سازی نسبت‌های ترکیبی بیواتانول، استون و ان-بوتانول متمرکز شود تا سودمندترین ترکیب‌ها را برای انواع موتورها و کاربردهای مختلف تعیین کند. علاوه بر این، استراتژی‌های پیشرفته کنترل موتور و سیستم‌های تطبیقی را می‌توان برای تنظیم پویا نسبت‌های افزودنی سوخت بر اساس عملکرد موتور و داده‌های انتشار در زمان واقعی بررسی کرد.
- ادامه بررسی اثرات بلندمدت این افزودنی‌های سوخت بر دوام موتور، از جمله سایش و خوردگی احتمالی اجزای موتور ضروری است. تأثیر زیست محیطی این افزودنی‌ها با توجه به فرآیندهای تولید و ارزیابی چرخه عمر آن‌ها نیز باید به طور کامل مورد بررسی قرار گیرد. با سخت‌تر شدن قوانین آلایندگی، تحقیقات باید بر توسعه فناوری‌های نوآورانه کنترل انتشار تمرکز کند که می‌تواند با این افزودنی‌ها برای دستیابی به آلایندگی‌های کمتر و بازده موتور بهبودیافته کار کند.
- مطالعه بر روی اثرات متقابل بیواتانول، استون و ان-بوتانول به عنوان افزودنی‌های سوخت بنزین، گامی ارزشمند در جهت بهینه‌سازی عملکرد موتور و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. آینده این تحقیق در اصلاح فرمول‌های افزودنی، توسعه سیستم‌های کنترل تطبیقی و پرداختن به ملاحظات زیست محیطی و دوام طولانی‌مدت برای مقابله با چالش‌های حمل‌ونقل پایدار و کارآمد در سال‌های آینده نهفته است.

تشکر و قدردانی

با تشکر از آزمایشگاه سوخت و موتور دانشگاه محقق اردبیلی در راستای حمایت و پشتیبانی از انجام آزمایشات تجربی این پژوهش

منابع

- [1] F. Hashemi, R. Pourdarbani, S. Ardabili, and J. L. J. A. T. A. Hernandez-Hernandez, "Life Cycle Assessment of a Hybrid Self-Power Diesel Engine," vol. 26, no. 1, pp. 17-28, 2023.
- [2] R. Pourdarbani, S. Ardabili, E. Akbarpouran, and J. L. J. A. T. A. Hernandez-Hernandez, "Exergo-Environmental Optimization of a Diesel Engine," vol. 25, no. 3, pp. 157-168, 2022.
- [3] M. M. EL-Kassaby, Y. A. Eldrainy, M. E. Khidr, and K. I. J. A. E. J. Khidr, "Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions," vol. 55, no. 1, pp. 243-251, 2016.

- [4] M. Kapusuz, H. Ozcan, and J. A. J. A. T. E. Yamin, "Research of performance on a spark ignition engine fueled by alcohol-gasoline blends using artificial neural networks," vol. 91, pp. 525-534, 2015.
- [5] B. Masum, H. Masjuki, M. Kalam, I. R. Fattah, S. Palash, and M. Abedin, "Effect of ethanol-gasoline blend on NOx emission in SI engine," *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 209-222, 2013.
- [6] B. Sugiarto, M. F. Dwinanda, D. Auliady, R. N. Andito, and C. J. I. J. o. T. Simanjuntak, "Investigation of Cyclohexanol as an Oxygenated Additive for Gasoline-Bioethanol Mixtures and Its Effect on the Combustion and Emission Characteristics of Spark Ignition Engines," vol. 12, no. 5, 2021.
- [7] Y. J. F. Cay, "Prediction of a gasoline engine performance with artificial neural network," vol. 111, pp. 324-331, 2013.
- [8] R. Karpagam, K. Jawaharraj, and R. J. S. o. T. T. E. Gnanam, "Review on integrated biofuel production from microalgal biomass through the outset of transesterification route: a cascade approach for sustainable bioenergy," vol. 766, p. 144236, 2021.
- [9] H. Hosseinzadeh-Bandbafha, F. Nazemi, Z. Khounani, H. Ghanavati, M. Shafiei, K. Karimi, Su. Sh. Lam, M. Aghbashlo and M. Tabatabaei, "Safflower-based biorefinery producing a broad spectrum of biofuels and biochemicals: A life cycle assessment perspective," *Science of The Total Environment*, vol. 802, p. 149842, 2022.
- [10] L. Xu, Y. Wang, and D. J. F. Liu, "Effects of oxygenated biofuel additives on soot formation: A comprehensive review of laboratory-scale studies," vol. 313, p. 122635, 2022.
- [11] M. J. Eslami, B. Hosseinzadeh Samani, S. Rostami, R. Ebrahimi, and A. J. B. Shirmeshan, "Investigating and optimizing the mixture of hydrogen-biodiesel and nano-additive on emissions of the engine equipped with exhaust gas recirculation," pp. 1-12, 2022.
- [12] S. Faizollahzadeh Ardabili, "Improving the combustion process of biodiesel using additives," Ph.D. thesis Fundamental, Biosystem Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 2021.
- [13] A. K. Agarwal, R. A. Agarwal, T. Gupta, and B. R. Gurjar, *Biofuels: technology, challenges and prospects*. Springer, 2017.
- [14] Y. K. Pochareddy, A.K. Ganeshram, H.M. Pyarelal, Sridharan, H.M. Srinivasan, A. Asokan, G. Dhamodaran and P. Duraisamy, "Performance and emission characteristics of a stationary direct injection compression ignition engine fuelled with diethyl ether-sapote seed oil methyl ester-diesel blends," vol. 8, no. 2, pp. 297-305, 2017.
- [15] A. Elfasakhany, *Benefits and drawbacks on the use biofuels in spark ignition engines*. LAP LAMBERT Academic Publishing Beau Bassin, Mauritius, 2017.
- [16] R. Niculescu, A. Clenci, V. Iorga-Siman, and C. Zaharia, "Review on the Use of Bioethanol/Biomethanol-Gasoline Blends in Spark Ignition Engine," *Sci. Bul. Automot. Ser. Year XXII*, vol. 26, 2016.
- [17] M. Deshmukh, D. S. Pendse, and A. Pande, "Effects of blending bioethanol with gasoline on spark-ignition engine-A review," *Journal of Integrated Science and Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 87-99, 2022.
- [18] M. Yusoff, N. Zulkifli, B. Masum, and H. Masjuki, "Feasibility of bioethanol and biobutanol as transportation fuel in spark-ignition engine: a review," *RSC advances*, vol. 5, no. 121, pp. 100184-100211, 2015.
- [19] S. K. Thangavelu, A. S. Ahmed, and F. N. Ani, "Review on bioethanol as alternative fuel for spark ignition engines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 820-835, 2016.
- [20] A. K. Thakur, A. K. Kaviti, R. Mehra, and K. Mer, "Performance analysis of ethanol-gasoline blends on a spark ignition engine: a review," *Biofuels*, vol. 8, no. 1, pp. 91-112, 2017.
- [21] O. I. Awad, R. Mamat, T. K. Ibrahim, A. T. Hammid, I.M. Yusri, M. A. Hamidi, A. M. Humada and A.F. Yusop, "Overview of the oxygenated fuels in spark ignition engine: Environmental and performance," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 394-408, 2018.
- [22] R. Mamat, A. Azri, K. J. I. J. o. A. Sudhakar, and M. Engineering, "Effects of lean combustion on Bioethanol-Gasoline blends using turbocharged spark ignition engine," vol. 18, no. 3, pp. 9140-9148, 2021.
- [23] B. Sugiarto, A. P. Adrian, C. Simanjuntak, N. A. Nubli, and N. Farisa, "The effect of low-grade bioethanol and oxygenated cyclooctanol additive utilization on a 125 CC motor's exhaust gas emission and coefficient of variation," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2376, no. 1: AIP Publishing. 2021.
- [24] I. Yamin, B. Sugiarto, M. T. Suryantoro, S. Abikusna, and S. F. Maulidina, "Analysis of utilization of low grade bioethanol and oxygenated additives to COV and heat release rate on SI engine," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2255, no. 1: AIP Publishing, 2020.
- [25] Z. Lee and S. J. R. E. Park, "Particulate and gaseous emissions from a direct-injection spark ignition engine fueled with bioethanol and gasoline blends at ultra-high injection pressure," vol. 149, pp. 80-90, 2020.
- [26] S. Abikusna, B. Sugiarto, R. Monasari, R. Aditya, and D. Hendrawan, "Performance analysis (WHP and torque) on SI engine fueled with low-grade bioethanol and oxygenated fuel additive," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 105: IOP Publishing, p. 012057. 2018.
- [27] A. Keskin and M. Gürü, "The effects of ethanol and propanol additions into unleaded gasoline on exhaust and noise emissions of a spark ignition engine," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, Environmental Effects*, vol. 33, no. 23, pp. 2194-2205, Oct 2011.
- [28] S. F. Ardabili, B. Najafi, M. Aghbashlo, Z. Khounani, and M. Tabatabaei, "Performance and emission analysis of a dual-fuel engine operating on high natural gas substitution rates ignited by aqueous carbon nanoparticles-laden diesel/biodiesel emulsions," *Fuel*, vol. 294, p. 120246, June 2021.

English Abstract

Experimental Investigating the mutual effects of bioethanol, acetone and n-butanol as gasoline fuel additives on the performance and emissions of a spark ignition engine

Hadi Ghaebi^{1*}, Hossein Babazadeh², Sina Faizollahzadeh Ardabili³

1- Professor, Mechanical Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabi, Iran. hghaebi@uma.ac.ir

2- MS student, Mechanical Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran. sina_fa1990@yahoo.com

3- Ph.D., Renewable Energy, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran. hosingbabazadeh74@gmail.com

*Corresponding author

(Received: 2024/01/16, Received in revised form: 2024/04/28, Accepted: 2024/05/06)

The general goal of this research is to find the right fuel composition containing bioethanol, gasoline, acetone and n-butanol in order to increase engine performance and reduce engine pollutants and energy production costs. In this research, in order to use sample fuels, a single cylinder engine was coupled with a 5kWh generator. A TDGC2-5kVA type variable resistor and a 1kW heater were used to load the motor. By measuring the power of the motor, the amperage and voltage of the electricity were measured. It should be noted that the engine test was performed at full load (100% load) and a fixed speed of 1500 rpm as the rated speed of the engine. Based on the obtained results, adding n-butanol from 2 to 5% caused a relative decrease and from 5 to 7% caused a relative increase in braking power. The lowest amount of braking power was obtained in the range of combined additives of bioethanol and n-butanol without acetone. The highest amount of braking power was obtained in the highest percentage of n-butanol, acetone and bioethanol additives in the gasoline fuel sample. In this interval, the thermal efficiency was also higher than the control fuel sample and the special braking fuel consumption was also lower than the control fuel sample. The highest amount of nitrogen monoxide emission was relatively in the sample of fuels containing combined additives of bioethanol and n-butanol. The lowest amount of nitrogen monoxide emission occurred in the fuel sample containing the combination of bioethanol and acetone. By adding n-butanol to fuel samples, the emission of nitrogen oxides increased. The results also showed that the effects of these additives can be highly dependent on engine design, operating conditions, and the specific blend ratios used. This research paves the way for several future research directions in the field of alternative fuel additives and spark ignition engines.

Keywords: Fuel additives, bioethanol, spark ignition engine, n-butanol, acetone